

完工期限指标下一类抢占式动态规则调度的性能分析

梁 犇, 于海斌

(中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 研究了一类以完工期限为指标的抢占式动态调度问题, 在整合剩余工件和新到达工件进行实时调度的模式下, 采用扩展最短交货期优先规则调度, 通过性能分析, 得到了最优调度的定理和推论。

关键词: 动态调度; 扩展最短交货期优先规则; 抢占式调度

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A

Performance analysis of a class of preemptive dynamic rule-based scheduling with due date objectives

LIANG Wei, YU Hai-bin

(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Liaoning Shenyang 110016, China)

Abstract: A class of preemptive dynamic scheduling problem with due date objectives was studied. According to the mode that unites the remaining parts in the system and the new arriving parts, the extended earliest due date(E-EDD)rule was proposed and applied to dynamic schedule. The optimal scheduling theorem and corollary were drawn and proven by scheduling performance analyses.

Key words: dynamic scheduling; extended earliest due date(E-EDD)rule; preemptive scheduling

1 引言(Introduction)

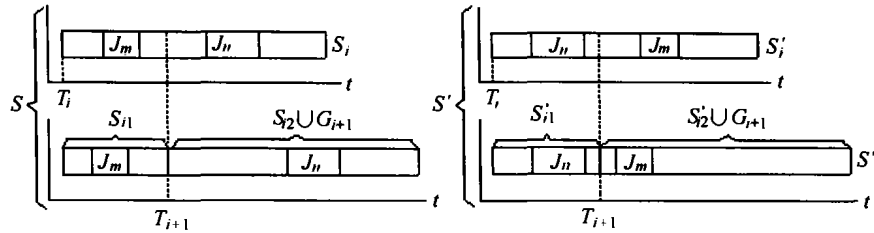
先进制造系统的日益复杂, 对动态调度提出了愈来愈明确的要求. 因此, 近来动态调度成为调度理论的研究热点^[1]. 动态调度有两个基本要求^[2]: 1) 充分利用已有信息决策; 2) 调度时间尽可能短. 目前, 虽然一些学者提出了很多解决动态调度问题的方法, 但是大多数研究都不能同时具备以上两个特点. 一般动态调度仍然以基于规则的调度为主, 但对动态调度环境下规则调度的全局性能分析还没有相关工作的报道^[1-4].

规则调度的最优性证明是以静态单机调度为背景的. 一方面单机调度在实际生产中经常遇到, 其研究具有实用价值; 另一方面, 单机动态调度的研究可以为多机调度提供近似算法. 因此, 本文针对以延迟时间为指标的一类抢占式动态调度, 提出扩展规则调度方法, 并分析了调度的全局最优性能.

2 规则调度的性能分析(Performance analysis of rule-based scheduling)

单机动态问题可以看作随时间增长不断按批次随机间歇到达的单机加工任务. 假定每个工件有自己的加工时间, 工件的装夹时间被折合到加工时间中, 被中断的工件继续加工时不需要重新装夹. 抢占式表现在正加工的工件可以被新到达的工件中断加工.

动态调度问题由多批工件组成. 显然, 分析相邻两个调度点的调度即可. 所谓“调度点”即新工件到达的时刻. 假设在调度点 T_i , 未加工工件集为 S_{i-1} , 新到达的工件集为 G_i , 则可调度工件集 $S_i = S_{i-1} \cup G_i$. 由于动态问题到达时间的限制, 如图 1 所示, 只有 T_i 点的调度会影响 T_{i+1} 点的调度, 反之不成立. 即 S_i 在 T_{i+1} 点剩余的工件 S_{i2} 不同, T_{i+1} 点的调度以及整个调度则不同, 但 G_{i+1} 对于 S_i 则没有影响. 由于 T_i 时刻的工件序列 S_i 决定 S , 所以参考文献[4]静态规则最优性证明, 在动态调度中, 假设序列 S 是最优的, 任意交换 S_i 的两个工件, 得到序列 S' , 证明 S 优于 S' , 则 S 最优.

图1 调度序列 S 及 S' 的分析Fig.1 Analysis of scheduling S and S'

3 主要结论(Main results)

完工期限是一类主要调度指标,其目标函数包括工件的最大延迟时间 $L_{\max}$ 、最大延误时间 $T_{\max}$ 等.

3.1 使最大延迟时间 $L_{\max}$ 最短的动态调度(Dynamic scheduling of minimizing $L_{\max}$)

该类问题的目标函数为

$$J = L_{\max} = \max_{i=1}^n \{l_i\}. \quad (1)$$

其中, J_i 为第 i 个工件, $i = 1, \dots, n$, n 为工件数, l_i 为 J_i 的延迟时间, $l_i = ct_i - dt_i$, ct_i 为 J_i 的完成时间, dt_i 为 J_i 的交货期.

参照文献[4],对于最大延迟时间最短的抢占式单机动态调度问题,应用“扩展最短交货期优先(extended EDD, E-EDD)规则”进行调度.“E-EDD”即在调度点对可调度工件集应用 EDD 规则调度.实际上,该调度方式相当于对全部投入工件的无滞后即时调度.对此,有如下结论:

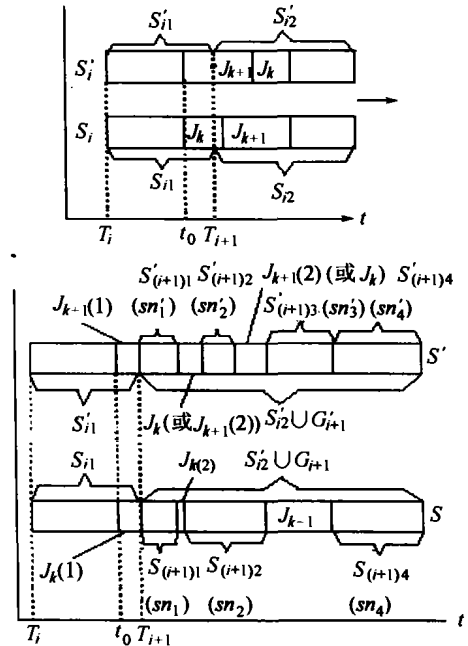
定理 1 对于最大延迟时间最短的抢占式单机动态调度问题,应用 E-EDD 规则,可以得到最优调度.即调度点的可调度工件满足 $dt_1 \leq dt_2 \leq \dots \leq dt_n$ 的加工顺序,可使 $L_{\max}$ 最小.

证 根据以上分析,本文将问题分成两类情况证明:批次不重叠和批次重叠.显然,对于批次不重叠的情况,应用 E-EDD 可以得到全局最优.而对于批次重叠的情况,采用反证法,首先对相邻两个工件违背 E-EDD 的不同情况进行证明,然后将结论推广到一般情况.

1) 假设满足 E-EDD 的序列 S 中两个相邻工件 J_k 和 J_{k+1} 满足 $dt_k < dt_{k+1}$, $J_k \in S_{i1}$, $J_{k+1} \in S_{i1}$ (或 $J_k \in S_{i2} \cup G_{i+1}$, $J_{k+1} \in S_{i2} \cup G_{i+1}$); 将 J_k 和 J_{k+1} 交换位置,得到 S' . 对于 S 和 S' , T_{i+1} 时刻, J_k 和 J_{k+1} 都加工完成.该情况类似于静态问题^[4],显然 S 优于 S' .

2) 假设满足 E-EDD 的加工序列 S 的 S_i 中存在两个相邻工件 J_k 和 J_{k+1} , 满足 $dt_k < dt_{k+1}$. T_{i+1} 时刻, J_k 正在加工, J_{k+1} 未被加工,两者都被重新调度.将 J_k 和 J_{k+1} 交换位置,得到序列 S' , T_{i+1} 时刻, J_{k+1} 正在加

工, J_k 未被加工,两者都被重新调度,如图 2 所示.

图2 两个相邻工件位于 T_{i+1} 前后(1)Fig.2 Two parts violating E-EDD near T_{i+1} (1)

注 sn_1 为序列 S 中 T_{i+1} 之后、 $J_k(2)$ 之前的工作数, sn_2 为序列 S 中 $J_k(2)$ 之后、 J_{k+1} 之前的工作数, sn'_1 为序列 S' 中 T_{i+1} 之后、 J_k 之前的工作数, sn'_2 为序列 S' 中 J_k 之后、 $J_{k+1}(2)$ 之前的工作数.

对于调度序列 S 和 S' 来说,分别考虑从 J_k 到 $J_{k+1+sn_1+sn_2}$ 所有工件的延迟时间:

$$\begin{cases} L_{k+2} = T_{i+1} + t_{k+2} - dt_{k+2}, \\ \vdots \\ L_{k+1+sn_1} = T_{i+1} + \sum_{j=k+2}^{k+1+sn_1} t_j - dt_{k+1+sn_1}, \\ \vdots \\ L_{k+1+sn_1+sn_2} = t_0 + \sum_{j=k+2}^{k+1+sn_1+sn_2} t_j + t_k - dt_{k+1+sn_1+sn_2}, \\ L_{k+1} = t_0 + t_k + t_{k+1} + \sum_{j=k+2}^{k+1+sn_1+sn_2} t_j - d_{k+1}, \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} L'_{k+2} &= T_{i+1} + t_{k+2} - dt_{k+2}, \\ &\vdots \\ L'_{k+1+sn'_1} &= T_{i+1} + \sum_{j=k+2}^{k+1+sn'_1} t_j - dt_{k+1+sn'_1}, \\ &\vdots \\ L'_{k+1+sn'_1+sn'_2} &= t_{i+1} + \sum_{j=k+2}^{k+1+sn'_1+sn'_2} t_j + t_k - \\ &\quad dt_{k+1+sn'_1+sn'_2}, \\ L'_{k+1} &= t_0 + t_k + t_{k+1} + \sum_{j=k+2}^{k+1+sn'_1+sn'_2} t_j - dt_{k+1}. \end{aligned} \right. \quad (2.2)$$

其中,抢占式造成工件分段加工, $J_i(s)$ 为 J_i 的第 s 段, $t_i(s)$ 为 $J_i(s)$ 的加工时间. 显而易见: $sn'_1 = sn_1$, $sn'_2 = sn_2$. L_0 为交货期小于 dt_k 的工件以及交货期大于 dt_{k+1} 的工件的延迟时间最大值, t_0 为 J_{k-1} 的完工时间, t_i 为 J_i 的加工时间. 所以:

$$\left\{ \begin{aligned} L'_k &> L_k, & L'_{k+1} &= L_{k+1}, \\ j \in [k+2, k+1+sn_1], & & L'_j &= L_j, \\ j \in [k+2+sn_1, k+1+sn_1+sn_2], & & L'_j &> L_j, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

则

$$L_{\max} = \max \{L_k, L_{k+1}, \dots, L_{k+1+sn_1+sn_2}\} \leq \max \{L'_k, L'_{k+1}, \dots, L'_{k+1+sn_1+sn_2}\} = L'_{\max},$$

因此, S 优于 S' .

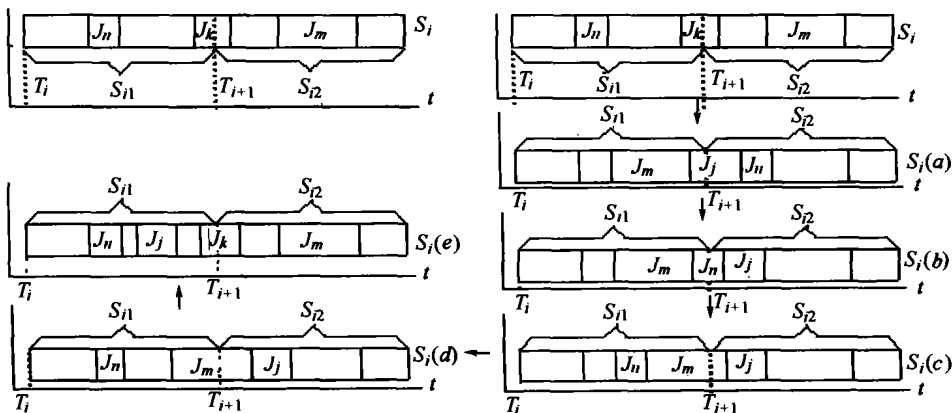


图3 任意交换 S_i 中的两个工件

Fig. 3 Exchanging two parts in S_i randomly

3.2 推论(Corollary)

由于工件的延迟时间 $Ta_i = \max \{L_i, 0\}$, 则最大延迟时间 $T_{\max}$:

$$T_{\max} = \max_i \{Ta_i\} = \max \{ \max \{L_1, 0\}, \max \{L_2, 0\}, \dots, \max \{L_n, 0\} \} =$$

3) 假设 S 满足 E-EDD, S_i 中两个相邻工件 J_k 和 J_{k+1} 满足 $dt_k < dt_{k+1}$.

① $t_k < t_{k+1}$, T_{i+1} 时, S 中 J_k 已经加工完成, J_{k+1} 正被加工, 在 T_{i+1} 被重新调度 J_{k+1} . 将 J_k 和 J_{k+1} 交换位置, 得到 S' , 在 T_{i+1} 时 J_{k+1} 正在加工, J_k 未被加工, 它们都在 T_{i+1} 被重新调度.

② $t_k > t_{k+1}$ 时, 在 S 中, T_{i+1} 时 J_k 正被加工, J_{k+1} 未被加工, 在 T_{i+1} 时两者都被重新调度. 然后将 J_k 和 J_{k+1} 交换位置, 得到 S' , 在 T_{i+1} 时 J_{k+1} 已经加工完成, J_k 正被加工, 则 J_k 被重新调度. 同理可得, S 优于 S' .

4) 一般情况如图3.

以上证明了相邻工件满足 E-EDD 规则的调度序列优于相邻工件不满足 E-EDD 的调度序列. 通过推广, 证明满足 E-EDD 规则的调度序列优于任意两个工件不满足 E-EDD 的最优调度序列.

如图3所示, S_i 与 G_{i+1} 构成的全局调度序列为 S . 如果交换 T_{i+1} 之前的 J_n 和之后的 J_m , 且 $dt_m > dt_n$, 得到 S' . 用 S^j 表示 $S_i(j)$ 对应的全局调度序列, 根据前面证明可知, S^a 优于 S' , S^b 优于 S^a , S^c 优于 S^b , 将 S_{i1} 内部的工件按照 EDD 调度的 S^d 优于 S^c , 将 S^d 中工件 J_m 与其后小于它的交货期限的工件交换得到的序列 S^e 优于 S^d . 而 S^e 与 S 相同, 所以, S 优于 S' .

总之, 遵循 E-EDD 的调度优于违背 E-EDD 的调度. 证毕.

$$\max \{L_1, L_2, \dots, L_n, 0\}.$$

因为 $T_{\max} = \max \{L_{\max}, 0\}$, 所以有以下推论:

推论1 对于抢占式单机动态调度问题, 应用 E-EDD 规则, 可以使工件的最大延迟时间最小.

但是, 和静态问题一样, 该推论也是不可逆的.

另外,规则调度的时间复杂度为 $O(n)$,显然可以同时满足动态调度的两个要求.

4 结论(Conclusion)

由于调度规则具有简单、易于实现、效率高和实时性好等优点.本文将扩展规则应用于抢占式单机动态调度问题,分析一类规则调度的性能,得到了最优调度的一般性结论.下一步,作者将进行多机动态调度问题规则调度的性能分析.

参考文献(References):

- [1] 吴澄,李泊虎.从计算机集成制造到现代集成制造——兼谈中国 CIMS 系统论的特点[J]. 计算机集成制造系统——CIMS, 1998, 4(5):1-6.
(WU Cheng, LI Bohu. From computer integrated manufacturing to contemporary integrated manufacturing —Also about the systematic character of CIMS of China [J]. *Computer Integrated Manufacturing System—CIMS*, 1998, 4(5):1-6.)

- [2] LEE In, MICHAEL S J. A neural-net approach to real time flow-shop sequencing [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2000, 38 (1):125-147.
[3] YU Haibin, LIANG Wei. Neural network and genetic algorithm based approach to expanded job shop scheduling [J]. *Computers and Industry Engineering*, 2001, 39(3,4):337-356.
[4] 陈荣秋,编. 排序的理论与方法[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1987:10-30.
(CHEN Rongqiu, ed. *Sequencing Theory and Methods* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1987:10-30.)

作者简介:

梁 桦 (1974—),女,1996年获中国科学院沈阳自动化研究所硕士学位,目前在中国科学院沈阳自动化研究所攻读博士学位.主要研究领域是动态调度理论.E-mail:weiliang@ms.sia.ac.cn;

于海斌 (1964—),男,中国科学院沈阳自动化研究所研究员,机械电子工程专业博士生导师.感兴趣的研究领域主要为智能生产调度,分布式控制系统.

书 讯

邓自立教授的新著《自校正滤波理论及其应用——现代时间序列分析方法》,已于2003年9月由哈尔滨工业大学出版社出版.这是邓自立教授继专著《最优滤波理论及其应用——现代时间序列分析方法》(2000年)和《卡尔曼滤波与维纳滤波——现代时间序列分析方法》(2001年)之后又一部专著.它们构成了现代时间序列分析方法完整的理论体系.该书用现代时间序列分析方法提出了自校正滤波理论及其应用.它解决含有未知模型参数和噪声统计系统的信号或状态的自校正(渐近最优)估计问题.

全书共分九章,包括离散随机系统模型,基于最小二乘法 ARMA 模型参数估计的几种快速算法,带观测噪声的 ARMA 模型参数估计快速算法,自校正白噪声滤波器,自校正 Kalman 滤波器,自适应 Kalman 滤波技术,自校正预报器,自校正 Wiener 滤波器,信息融合自校正滤波理论,并给出了在雷达跟踪系统中的仿真应用.内容新颖,理论严谨,并含有大量仿真例子.

本书可作为高等学校控制理论与控制工程、信号处理、检测与估计等专业的研究生及本科高年级学生教材,也可供在信号处理、控制、通信、航天、制导、雷达跟踪、石油地震勘探、故障诊断、卫星测控、GPS 定位、多传感器信息融合、机器人、经济、生物医学等领域工作的科技人员参考.

该书 16 开本,49.5 万字,每册定价 33 元,欲购者请与哈尔滨工业大学出版社尹继荣联系.

地址:哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编:150006

电话:0451-86414349 传真:0451-86414749 手机:13946097515